

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



УДК 669.018

А.Б.Бондарев*, Д.А.Масленков, М.А.Хусаинов, В.А.Андреев*

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ TiNi С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

* Промышленный центр «МАТЕКС», Москва

In paper studies results of the effect of reactive stresses generating in spherical segments at a re-heating stage are represented. It has been shown that segment, mirror-like bended to initial form in martensite, recovers its initial form by leap together with impact during the re-heating process in the presence of counter body and further reactive stresses developing. It has been determined that the impact of maximum strength is realized during the first peak of loading. Here, overheating to 150° C relatively back martensite temperature do not deteriorate force parameters but to the contrary tend to heighten them.

Обнаруженное нами явление скачкообразного восстановления формы сферического сегмента при отогреве активно изучается. Показано [1-3], что сферические сегменты после их прогиба в мартенситном состоянии зеркально исходному очертанию при отогреве теряют устойчивость и прощелкивают к центру кривизны с хлопком. При этом эффект хлопка реализуется, если сегмент свободен по краям. Выпуклые сегменты, защемленные по краям, не прощелкивают. Восстановление сообщенной в мартенсите деформации происходит с хлопком как при отсутствии противодействующего тела, так и при его наличии. В последнем случае эффект хлопка сопровождается ударом о контртело. Силу удара можно определить, если противодействующим телом является динамометр.

Однако реализовать условия, обеспечивающие удар максимальной силы, оказалось достаточно трудно несмотря на простую геометрию сферических сегментов (диаметр пластинки D , ее толщина h и радиус кривизны срединной поверхности R). На рис.1 показан общий вид сферического (выпуклого) сегмента. Экспериментальные и теоретические исследования зависимости силы удара от геометрических параметров указанных объектов позволили установить взаимосвязь между ними [4,5] и найти их оптимальные значения.



Рис.1. Общий вид сферического сегмента

Данная работа посвящена изучению механического поведения сферических сегментов из сплава Ti-50,2ат. %Ni при механотермическом циклировании, которое включает деформирование (изгиб) сегмента в мартенсите зеркально исходной форме и последующий отогрев до аустенитного состояния с ударом о противодействующее тело. Все эксперименты выпол-

нялись на разрывной машине. Выпуклые сегменты помещались в специальную прессформу, прогибались и отогревались. В результате реализовался удар с развитием реактивных усилий, поскольку противодействующее тело препятствовало полному восстановлению формы сегмента. Типичная диаграмма прогиба выпуклого сегмента с генерацией реактивных усилий представлена на рис.2.

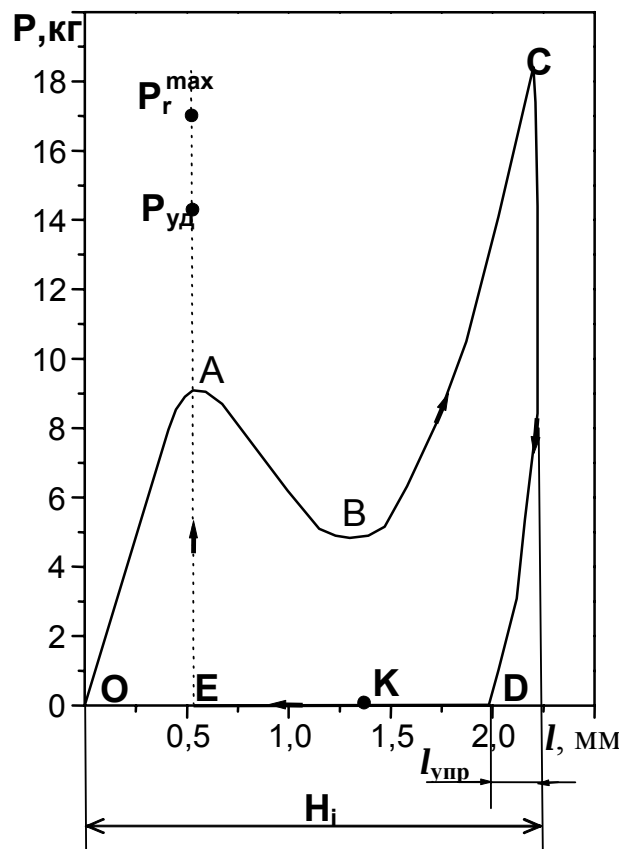


Рис.2. Диаграмма нагружения OABC, разгрузки CD в мартенсите и свободного хода DE при отогреве до противодействующего тела (в точке E) с ударом ($P_{уд}$) и развитием реактивных усилий (P_r)

Прогиб сегмента $l = (2H_i - h) - l_{\text{упр}}$, где H_i — стрела прогиба ($i = 1, \dots, n$). В точке К на этапе нагрева сферический сегмент теряет устойчивость и, резко восстанавливая форму, ударяется о препятствие в точке Е. Температура, при которой происходит возврат формы с хлопком зависит от соотношения размеров сегмента. Если совершается скачок деформации большой силы при наличии противодействующего тела, то температура потери устойчивости всегда выше A_k — температуры окончания обратного мартенситного превращения. Хорошим показателем силовых характеристик сегментов является относительный диаметр (D/R) при заданной толщине. При $D/R = 0,85-0,95$ всегда реализуется эффект хлопка максимальной силы.

На рис.3 приведены кривые, иллюстрирующие изменения силы удара и реактивных усилий от числа циклов. Видно, что указанные характеристики устойчиво повторяются в каждом последующем цикле, демонстрируя довольно высокий силовой уровень и обратимость деформации.

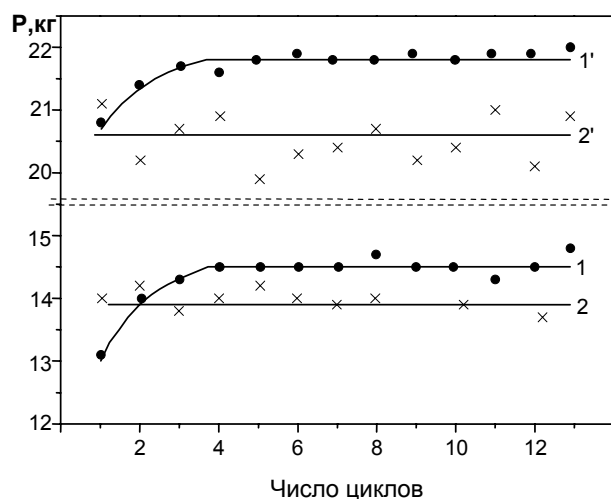


Рис.3. Зависимость силы удара (1, 2) и реактивных усилий (1', 2') от числа циклов. После отжига 420°C, 1,5 ч (1, 1') и 420°C, 3 ч (2, 2'). $D = 16,8$ мм, $h = 0,45-0,47$ мм

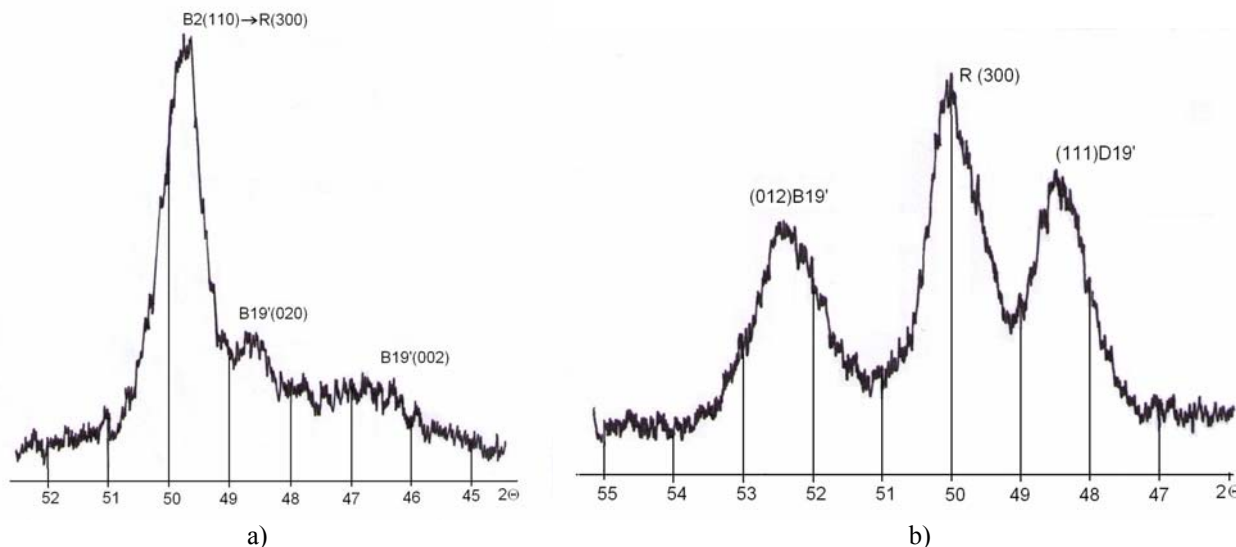


Рис.4. Дифрактограммы с поверхности купола сферического сегмента (а) и с деформированного участка (б) после задания формы и памяти (при 420°C, 1,5 ч). $D = 17$ мм, $h = 0,45$ мм, $R = 20$ мм

Анализ дифрактограмм, полученных с поверхности сегментов после задания формы (рис.4а) и после нагружения до области точки А (рис.4б), свидетельствует о разных структурных состояниях сплава. В первом случае структура более однородна. Наблюдаемое уширение и смещение брэгговских отражений B2(110) и B2(112) связано с образованием промежуточной структуры в виде ромбоэдрической фазы R-мартенсита. Прямым доказательством этого является дифрактограмма, снятая на стадии нагружения (рис.4б), на которой наглядно показан этап завершения фазового перехода B2→R. Образование B19' мартенсита при нагружении (прогибе) сегмента сопровождается наведением макроскопической деформации мартенсита и явлением памяти формы при нагреве.

Таким образом, на сегментах из заданного сплава реализуется следующая последовательность мартенситного перехода: при прогибе B2→R→B19'; при отогреве B19'→B2. Фазовый наклеп на этапе отжига сегмента в защемленном состоянии и образова-

ние R-фазы способствуют стабилизации структуры сплава, обеспечивая высокий уровень силовых характеристик и их неизменяемость при механотермическом циклировании. Возможность создания таких условий определяется геометрией сферического сегмента и видом термической или иной обработки. В этой связи представляют особый интерес перегревы активных элементов из сплавов с памятью формы, каким являются выпуклые сегменты.

Ниже представлены первые результаты влияния перегревов на функционально-механические свойства сегментов из заданного сплава (рис.5).

Видно, что перегревы до 100,150°C повышают силовые характеристики вследствие старения, обусловленного стадией предвыделения избыточных фаз Ti_3Ni_4 и $TiNi_3$ [6], поскольку растворимость никеля в титане определяет существование двухфазной области B2 + $TiNi_3$. При этом B2-матрица постепенно обедняется никелем, а стадии предвыделения и когерентного выделения сопровождаются возникновени-

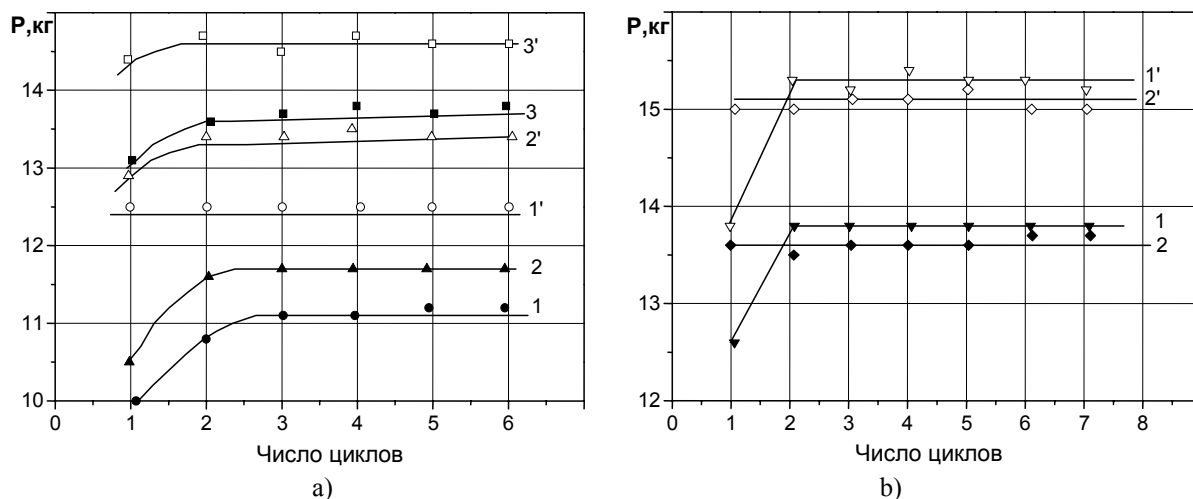


Рис.5. Изменение силовых характеристик сферических сегментов ($D = 19,8$ мм, $h = 0,46$ мм, $R = 23$ мм) после перегревов. а) 1 — $P_{уд}$; 1' — P_r после отжига 420°C , 1,5 ч в заземленном состоянии; 2 — $P_{уд}$; 2' — P_r после вылеживания в течение 5 мин при 100°C ; 3 — $P_{уд}$; 3' — P_r при 100°C , 30 мин; б) 1 — $P_{уд}$; 1' — P_r при 100°C , 60 мин; 2 — $P_{уд}$; 2' — P_r в заземленном состоянии при 150°C , 60 мин

ем полей ориентированных напряжений, способствующих упрочнению сплава. Характеристические температуры мартенситных превращений в этом случае снижаются. Одновременно понижается и температура скачка деформации с 51°C до 47°C .

Выводы

1. Впервые дан анализ эффекта генерации реактивных сил, возникающих в материале сферических сегментов оптимальной геометрии. В частности показано, что сегменты диаметром 17 мм и массой 1,53 г развивают значительные динамические и статические усилия при отогреве $P_{уд} \approx (14-14,5)$ кг и $P_r = (20,5-22)$ кг.

2. Установлено, что перегрев до 150°C активных элементов (выпуклых сегментов) из сплавов TiNi с памятью формы не снижает, а повышает уровень развивающихся в мартенсите реактивных усилий. Этот результат является чрезвычайно важным с прак-

тической точки зрения, например, при проектировании отсечных клапанов для использования их в теплоэнергетике и химической промышленности.

1. Khusainov M.A., Letenkov O.V., Pazgalov A.F., Belyakov V.N. // The Actual Problems of Strength: The 30th Interrepublican Workshop proceedings (in Russian). Novgorod, 16-19 May, 1994. P.2. P.152-158.
2. Khusainov M.A. // ЖТФ. 1997. Т.67. №6. С.118-120.
3. Khusainov M.A., Malukhina O.A., Belyakov V.N., Letenkov O.V. // Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Super-elastic Technologies. California, USA. 2-4 March, 1997. P.215-219.
4. Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч.1. Структура, фазовые превращения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С.230-237.
5. Попов С.А., Андреев В.А., Хусайнов М.А., Бондарев А.Б. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2006. №39. С.28-30.
6. Пуцин В.Г., Кондратьев В.В., Хачин В.Н. // Известия вузов. Физика. 1985. №5. С.5-16.